

DETECCIÓN DE HIDROCARBUROS MEDIANTE GEO-RADAR

FRANCISCA Franco M.⁽¹⁾ RINALDI Víctor A.⁽²⁾ SANTAMARINA Juan C.⁽³⁾

Síntesis

La contaminación del suelo y de las aguas superficiales o subterráneas tiene importantes riesgos para el medio ambiente y la sustentación de la vida humana. En los estudios geoambientales es fundamental poder determinar tanto los niveles de contaminación como la extensión del área afectada. Los métodos existentes para la detección de contaminantes orgánicos en suelos se basan en el análisis de la composición química del líquido intersticial de muestras obtenidas in situ. Las prospecciones con georadar o “ground penetrating radar (GPR)” permiten potencialmente reducir el número de análisis químicos y obtener una visión más general del problema. En este trabajo se presenta un estudio de laboratorio de los parámetros dieléctricos de arenas contaminadas con fluidos orgánicos. Los resultados obtenidos permiten evaluar las limitaciones del GPR para detectar hidrocarburos en suelos en forma no destructiva. Finalmente se presentan la aplicación directa de los resultados de calibración mediante el uso del GPR para monitorear un derrame de kerosene en un prototipo de laboratorio.

Introducción

Existen muchos tipos de contaminantes y formas de contaminación del suelo producto de las actividades del hombre. Estos contaminantes provocan posteriormente la contaminación de aguas superficiales y subterráneas con los consecuentes riesgos para la sustentación de la vida humana y la función ecológica del agua en el medio ambiente. Irwin et al. (1997) ha señalado los límites admisibles de contaminación en agua y suelo y el efecto de los mismos en la salud humana y en la vida de animales y vegetales.

Los tipos de contaminantes

comúnmente encontrados pueden clasificarse en compuestos orgánicos y compuestos inorgánicos. En este trabajo se estudia la contaminación del suelo con fluidos orgánicos. Los mismos se encuentran dentro de los contaminantes peligrosos para la calidad del agua subterránea más frecuentemente encontrados (Fetter, 1993). Estos compuestos pueden encontrarse como productos orgánicos naturales o como productos químicos orgánicos (Schwille, 1984).

En este contexto, tiene fundamental importancia el control y seguimiento de la contaminación con fluidos orgánicos debajo de

⁽¹⁾ Estudiante de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, U.N.C., Becario del CONICOR, Córdoba, Arg.
E-mail: ffrancis@gtwing.efn.uncor.edu

⁽²⁾ Prof. Asociado, U.N.C., Investigador del CONICET, Córdoba, Arg.

⁽³⁾ Professor at Georgia Institute Of Technology, Atlanta, Georgia, USA.

la superficie de la tierra y el tratamiento de los medios contaminados. Los métodos existentes para la detección de contaminantes en suelos se basan en el análisis del líquido intersticial de muestras obtenidas in situ (ej. cromatografía gaseosa CG, la espectrometría de masa SM y los "hidrocarburos de petróleo totales TPH"). Los métodos eléctricos utilizados en la geofísica permiten obtener información de las características de un suelo de manera no destructiva. Una descripción de estos métodos puede encontrarse en "Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations" (US Army Corps of Engineers, 1995). El GPR permite caracterizar en forma rápida y no invasiva el subsuelo a partir de cambios en la permitividad dieléctrica (Annan, 1992). Barber y Morey (1994), Redman et al. (1994), y Brewster et al. (1995) utilizaron el georadar para la detección de contaminantes orgánicos en suelos. Algunas de las dificultades encontradas por estos autores fueron la detección de películas delgadas de hidrocarburos, la saturación parcial del suelo, y las heterogeneidades de los acuíferos naturales.

El objetivo de este trabajo es determinar a partir de mediciones dieléctricas en mezclas de arena - agua y arena - aceite de parafina, las limitaciones del GPR para la detección de contaminantes orgánicos in situ. Se analizan los límites de detección y se determinan los cambios en las propiedades

dieléctricas del suelo que son necesarios para que sectores contaminados puedan ser detectados con el GPR.

La Permitividad Dieléctrica del Suelo

La permitividad dieléctrica relativa (k^*) es un parámetro complejo, en donde la componente real (k') representa la capacidad que tiene el material de polarizarse en presencia de campos eléctricos variables, y la componente imaginaria (k'') está asociada con las pérdidas dieléctricas o de polarización y a las pérdidas por conducción ohmica.

$$k^* = k' - j k'' \quad (1)$$

Las propiedades dieléctricas de los suelos dependen de la permitividad de cada una de las fases, del contenido volumétrico de agua y de la frecuencia de medición (ej. Arulanandan y Smith, 1973, Hipp, 1974; Wobschall, 1977; Thevanayagam, 1995; Rinaldi y Francisca, 1999). Por otro lado, en la frecuencia de funcionamiento del GPR pocos trabajos han sido publicados sobre las propiedades dieléctricas de mezclas de partículas con contaminantes orgánicos, alguno de ellos son: Alharthi et al. (1986), Baker y Monash (1991), Santamarina y Fam (1997) y Darayan et al. (1998).

Las propiedades dieléctricas de un suelo gobiernan el fenómeno de propagación de ondas electromagnéticas. Cuando una onda se encuentra con un material diferente, en la interfase parte de la onda se refleja y parte se

transmite al nuevo medio según las conocidas leyes de Snell. En las prospecciones con GPR resulta de interés realizar consideraciones energéticas para las reflexiones. De esta manera es posible estimar cuando una interfase generará una respuesta detectable por el GPR. Para ello se utiliza el coeficiente de reflexión de energía R_E que para materiales poco conductivos resulta igual a:

$$R_E = \left(\frac{\sqrt{k_1'} - \sqrt{k_2'}}{\sqrt{k_1'} + \sqrt{k_2'}} \right)^2 \quad (2)$$

En donde k_1' y k_2' son la permitividad dieléctrica real del medio por el cual viaja la onda y la del material con que esta se encuentra. Dos reglas conservadoras utilizadas para determinar cuando se tendrá éxito en la detección de objetos con el GPR son que el coeficiente de reflexión de energía sea al menos igual a 0,01 y que la relación entre la profundidad y la menor dimensión del material en el cual se refleja la onda no sea superior a 10:1 (Annan, 1992). Note que estas consideraciones proporcionan información orientativa y que estudios más complejos deberían considerar la performance del radar, la capacidad de penetración de una onda en el medio (función de la atenuación de la onda), la resolución deseada (función de la longitud de onda), las reflexiones en múltiples estratos, etc. Adicionalmente, debe tenerse en cuenta que con mayores frecuencias se obtiene mayor resolución pero menor es la profundidad que la onda penetra en el medio.

Por otro lado, la permitividad dieléctrica cambia debido a las variaciones volumétricas de las fases presentes (partículas, aire, agua y contaminante). Esta dependencia de k' puede ser calculada con la ayuda de modelos de mezclas (Sach y Splieger, 1964; Van Beek, 1967; De Loor, 1968; Wobschall, 1977; Thevanayagam, 1995). Uno de los modelos más aceptados se denomina CRIM "complex refractive index mixture" que para mezclas de dos o más fases resulta:

$$k' = \left(\sum_i \frac{v_i}{v_T} k_i'^{1/2} \right)^2 \quad (3)$$

en donde k' y k_i' son la permitividad dieléctrica real de la mezcla y del componente i respectivamente, v_T y v_i son el volumen total y el volumen de la espécimen i .

Procedimiento de Ensayos y Dispositivos de Medición

Las mediciones de permitividad dieléctricas fueron realizadas con un Analizador de Redes HP8752A utilizando una punta de medición HP85070A. Todos los ensayos fueron realizados en un intervalo de frecuencias desde 20 MHz hasta 1,3 GHz. Previo a la ejecución de los ensayos, el sistema fue calibrado incluyendo mediciones de circuito abierto y cerrado y en un material con propiedades dieléctricas conocidas que en este caso se utilizó el agua deionizada ($k' = 78,5$).

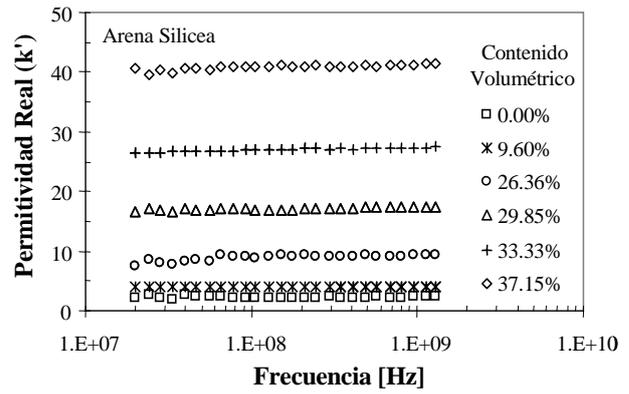
Para el estudio se utilizó una arena silíceo pobremente graduada ($Cu = 2,1$ y $Cc =$

0,98). Las muestras de suelo fueron secadas en estufa (a 105 °C) hasta obtener peso constante. Posteriormente, se prepararon mezclas de suelo con distintos contenidos de agua deionizada y aceite de parafina. Estas mezclas fueron compactadas en un recipiente de medición en donde se determinó el contenido volumétrico de cada una de las fases y las propiedades dieléctricas de la mezcla.

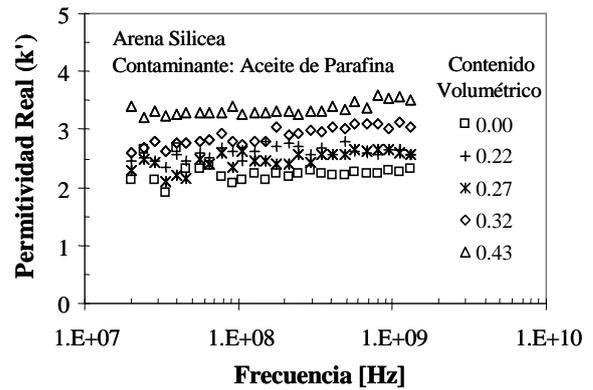
Análisis de los Resultados y Discusión

La Figura 1.a muestra la permitividad dieléctrica de mezclas de arena con diferentes contenidos volumétricos de agua deionizada ($k' = 78,5$). En la Figura 1.b se presentan los resultados obtenidos cuando se utilizó aceite de parafina ($k' = 2,01$). Observe que k' resulta independiente de la frecuencia por lo cual las propiedades dieléctricas de las mezclas dependen únicamente de las propiedades y composición relativa de las fases presentes (no se advierten polarizaciones del tipo Maxwell-Wagner). Por esta razón, k' aumenta con el contenido volumétrico de los fluidos. Este incremento es mucho más importante en las mezclas con agua que en las que se utilizó aceite de parafina debido a la más alta permitividad dieléctrica del agua.

La componente imaginaria k'' obtenida en las mediciones en arena húmeda y en arena contaminada fueron prácticamente nulas. El comportamiento observado se debe a que, en las frecuencias de estudio, las mezclas son malas conductoras de la corriente eléctrica.



(a)



(b)

Figura 1: Respuesta espectral de la permitividad dieléctrica de una arena silíceica mezclada con distintos contenidos volumétricos de agua (a) y de aceite de parafina (b).

En la Figura 2 se presenta la variación de la permitividad real de las mezclas ensayadas en función del contenido volumétrico del fluido intersticial. Observe que los valores obtenidos en las mezclas de arena-agua y arena-aceite de parafina determinan respectivamente un límite superior e inferior de los posibles valores de k' . De esta forma, para cada contenido volumétrico, valores de k' inferiores a los correspondientes a las mezclas de arena con agua indican la presencia de contaminantes orgánicos. Observe que para comprobar la posible contaminación del suelo es necesario determinar previamente la permitividad del

suelo y el contenido volumétrico de la fase fluida.

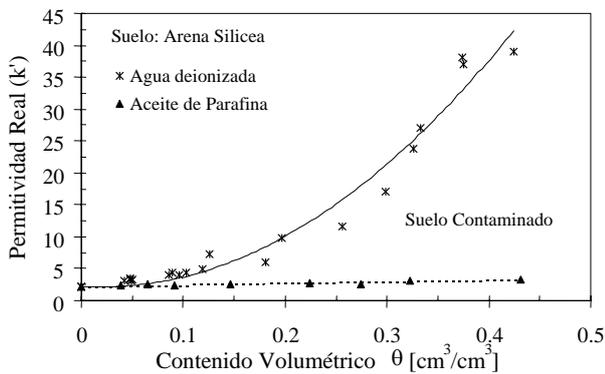


Figura 2: Variación de la permitividad real de la arena en función del contenido volumétrico de agua y aceite de parafina.

A partir del coeficiente de reflexión de energía y las propiedades dieléctricas de las mezclas arena-agua y arena-contaminante se determinó cual es la diferencia de permitividad k' necesaria para asegurar de forma conservadora que con el GPR se podrá detectar el orgánico. En la Figura 3 se presentan los resultados obtenidos utilizando el modelo de CRIM extendido para cuatro fases (partícula, aire, agua y contaminante). Los resultados obtenidos permiten determinar cual debería ser el contenido de aceite de parafina en los poros del suelo para que se pueda diferenciar con el GPR entre un suelo limpio y otro contaminado para un determinado contenido volumétrico del fluido intersticial. En esta figura se presenta además, k' en función del contenido volumétrico para el 0, 30, 60 y 100% del volumen de los poros ocupados por el aceite de parafina. Observe que el límite de detección se encuentra muy próximo a la curva de k' para el 30 % del

volumen de los poros ocupados por el contaminante. Esto significa que no sería conservador asegurar que es posible detectar contaminantes orgánicos con el GPR en arenas cuando menos del 30 % de los vacíos se encuentren ocupados por el contaminante orgánico.

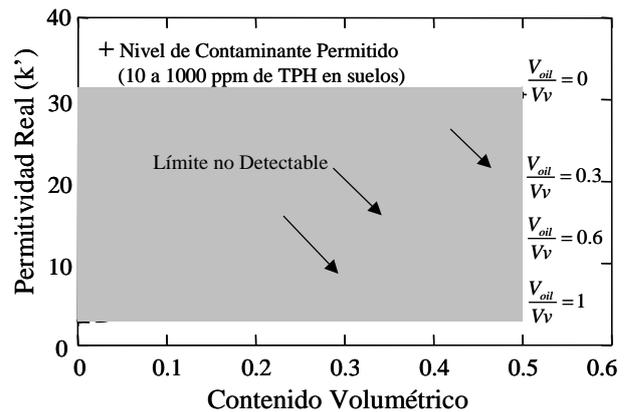


Figura 3: Permittividad dieléctrica real de la arena en función del contenido volumétrico del fluido intersticial. Valores calculados con el modelo de CRIM extendido para cuatro fases considerando distintos niveles de contaminación.

En la misma Figura 3 se muestra también la permitividad dieléctrica que se obtendría con el modelo CRIM en la arena estudiada cuando se encuentre con el máximo nivel de contaminación del suelo admisible (Irwin, et al., 1997). Observe que el límite permisible de hidrocarburos en suelos se encuentra muy próximo a los valores de k' para mezclas de arena-agua y dentro de la zona no detectable por el GPR. Por lo tanto, con el geo-radar no es posible asegurar que en un suelo no se encuentran presentes hidrocarburos debiendo utilizarse para ello métodos tradicionales (CG, SM o TPH). Por lo tanto, las aplicaciones del GPR en estudios de

contaminación se deben limitar a la determinación de la extensión de zonas contaminadas y al monitoreo del desplazamiento de fluidos no miscibles en suelos.

Ejemplo de Aplicación del GPR Para la Detección de Contaminantes Orgánicos

El equipo utilizado en este estudio es un GPR fabricado por la firma MALÅ GeoScience designado con la marca comercial RAMAC/GPR. Este aparato es un equipo portátil con un sistema completamente digital especialmente diseñado para trabajos de prospección geotécnica. La calibración, manejo del equipo y procesamiento de las señales obtenidas se realizó mediante un software especializado provisto por el fabricante.

La antena transmisora envía un pulso cuya amplitud es de 370V en la frecuencia seleccionada. Esta onda penetra en el medio en estudio, cuando encuentra un cambio de impedancia parte de la misma se refleja y es captada en la superficie por una antena receptora. Las mediciones fueron realizadas a una frecuencia de 1 GHz. La separación entre cada medición fue de 0,25 cm, mientras que la distancia entre la antena receptora y transmisora fue de 11,0 cm. En cada uno de los puntos de medición se tomaron 256 señales las que fueron promediadas entre sí previa medición del punto siguiente.

Las mediciones con GPR fueron realizadas en un recipiente de vidrio con las siguientes dimensiones: altura 30 cm, profundidad 30 cm y largo 80 cm. En el mismo se generó intencionalmente un perfil vertical de suelos compuesto de 17 cm de arena seca, por debajo de ésta 12 cm de arena húmeda no saturada y por último 1 cm de arena saturada. En este prototipo fueron realizadas sucesivas mediciones con el radar a medida que se derramaba en la superficie del mismo volúmenes conocidos de kerosene.

En la Figura 4.a se presenta una imagen obtenida con el GPR mostrando el estado inicial de la muestra antes de que se produzca el derrame del kerosene. En la misma se observan claramente las reflexiones correspondientes a la superficie de la arena seca, la interfase arena seca - arena húmeda, y la reflexión correspondiente al nivel freático y fondo del recipiente.

Posteriormente, se derramaron 9 litros de kerosene en la superficie del prototipo previamente descrito. Para cada litro de kerosene introducido se realizó una medición con el GPR. En la Figura 4.b se presenta una imagen obtenida con el radar cuando 9 litros de kerosene fueron introducidos en la arena. Las imágenes 4.a y 4.b fueron procesadas de igual manera. Mediante la comparación de las imágenes se localizó el kerosene dentro del suelo. Observe que el contaminante fue detectado tanto en la arena seca como en la arena parcialmente saturada con agua. Sin

embargo, en la zona capilar la cantidad de kerosene que penetró no fue suficiente para producir reflexiones claras, por lo cual detección resultó más dificultosa. Observe que las imágenes obtenidas con el GPR permitieron determinar claramente la extensión de la zona contaminada.

Síntesis y Conclusiones

Las propiedades dieléctricas de mezclas de arena con agua y con contaminantes orgánicos se mantienen constantes en toda la frecuencia de trabajo del GPR. Adicionalmente, la permitividad real incrementa con el contenido volumétrico del fluido intersticial. Este incremento es mucho más importante en mezclas de arena con agua que en mezclas con aceite de parafina. La baja permitividad dieléctrica de los fluidos orgánicos respecto del agua explican este comportamiento.

Mediante mediciones de k' en función del contenido volumétrico de agua y aceite de parafina se pudo obtener curvas de calibración que permiten determinar la presencia de fluidos orgánicos en arena mediante mediciones dieléctricas. Para su utilización es necesario conocer con anterioridad el contenido volumétrico del fluido intersticial. Para un determinado contenido volumétrico, valores de k' inferiores a los obtenidos en mezclas de arena y agua indican la presencia de contaminantes orgánicos.

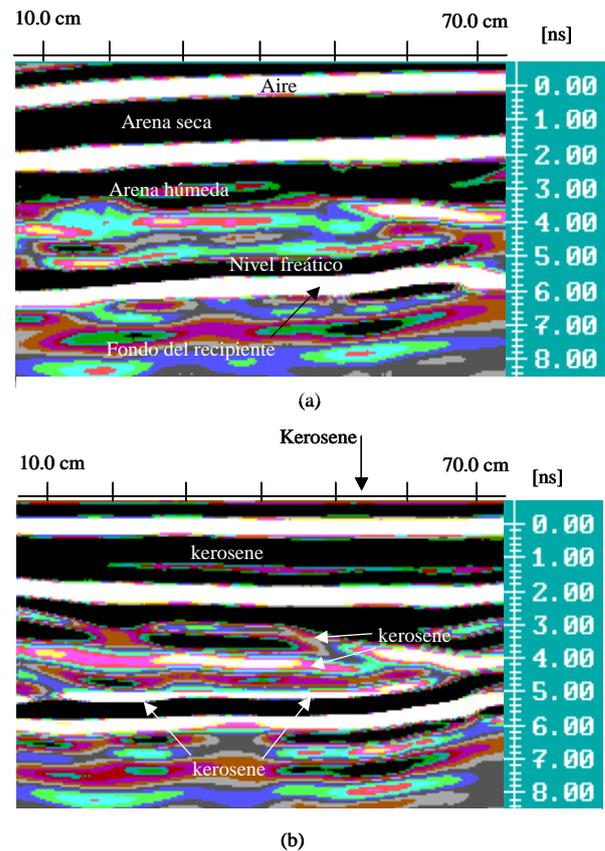


Figura 4: Imágenes obtenidas con el GPR: a) estado inicial, b) después de introducir 9 litros de kerosene en el suelo.

El GPR puede ser utilizado para detectar in situ la presencia de contaminantes orgánicos en el suelo cuando el contenido volumétrico del fluido orgánico resulte superior al 30 % aproximadamente del volumen de los poros. (Figura 3). Debido a ello, la presencia de contaminantes orgánicos puede ser más fácilmente identificada cuando el suelo se encuentra inicialmente seco, mientras que en zonas parcialmente saturadas su localización resulta más compleja.

El trabajo muestra que las aplicaciones del geo-radar en medios contaminados resultan más apropiadas para monitorear el desplazamiento de contaminantes en el suelo

(ej. para monitorear el derrame de contaminantes y procesos de remediación o limpieza de suelos) que a la detección en si misma.

Referencias

- Alharthi A., Lange J. and Whitaker E., 1986, "Immiscible Fluid Flow in Porous Media: Dielectric Properties", *J. of Contaminant Hydrology*, Vol. 1, pp.107-118.
- Annan, A. P., 1992, "Ground Penetrating Radar Workshop Notes", *Sensors & Software Inc.*
- Arulanandan K. and Smith S .S., 1973, "Electrical Dispersion in Relation to Soil Structure", *J. of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 99, No SM12, December, pp. 1113-1133.
- Baker P.L. and Monash U., 1991, "Fluid, Lithology, Geometry, And Permeability Information Form Ground Penetrating Radar For Some Petroleum Industry Applications", *Society of Petroleum Engineers*, SPE 22976, pp. 277-287.
- Barber W.B. and Morey R., 1994, "Radar Detection of thin Layers of Hydrocarbon Contamination", *GPR'94 Proceeding of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*, Volume III Environmental and Groundwater, pp. 1215–1228.
- Brewster M.L., Annan A.P., Greenhouse J.P., Kueper B.H., Olhoef G.R., Redman J.D. and Sander K.A., 1995, "Observed Migration of Controlled DNAPL Release by Geophysical Methods", *Ground Water*, Vol. 3, N° 6, pp. 977–987.
- Darayan S. Liu C. Shen L. C. and Shatthuck, 1998, "Measurment of Electrical Properties of Contaminated Soil", *Geophysical Prospecting*, Vol. 46, pp. 477-488.
- De Loor G.P., 1968, "Dielectric Properties of Heterogeneous Mixtures Containing Water", *J. of Microwave Power* 3-2, pp. 67-73.
- Fetter C. W., 1993, "Contaminant Hydrogeology", Second Edition, *Prentice Hall*, 500p.
- Hipp J. E., 1974, "Soil Electromagnetic Parameters as Function of Frequency, Soil Density, and Soil Moisture", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 62, N° 1, pp. 98-103.
- Irwin R., VanMouwerik M., Stevens L., Seese M., and Basham W., 1997, "Environmental Contaminants Encyclopedia", National Park Service, *Water Resources Division*, Fort Collins, Colorado.
- Redman J. D., DeRyck S. M. and Annan A. P., 1994, "Detection of LNAPL Pools with GPR: Theoretical Modeling and Surveys of Controlled Spill", *GPR'94, Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*, Vol. 3.
- Rinaldi V.A. and Francisca F.M., 1999a, "Impedance Analysis of Soil Dielectric Dispersion (1 MHz to 1 GHz)", *ASCE, J. of Geotechnical Engineering*, pp. 111-121.
- Sachs, S. B., and Spiegler, K. S., 1964, "Radiofrequency Measurements of Porous Conductive Plugs, Ion Exchange Resin-Solution Systems", *J. of Physical Chemistry*, Vol. 68, pp. 1214-1222.
- Santamarina J. C. and Fam M., 1997, "Dielectric permittivity of Soils Mixed with Organic and Inorganic Fluids (0.02 GHz to 1.30 GHz)", *J. of Environmental & Engineering Geophysics*, Vol. 2, No 1, pp. 37-51.
- Schwille F., 1984, "Migration of Organic Fluids Immiscible with Water in Unsaturated Zone", from "Pollutants in Porous Media" The Unsaturated zone Between Soil Surface and Groundwater, Vol. 47, Ecological Studios, Yaron B., Dagan G. and Goldshmid J. (Ed.), *Springler Verlag*.
- Thevanayagam, S., 1995, "Frequency-Domain Analysis of Electrical Dispersion of Soils", *J. Geotechnical Engineering*, ASCE 121, No 8, pp. 618-628.
- US Army Corps of Engineers, 1995, "Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Applications", 208p.
- Van Beek, L.K., 1967, "Dielectric Behavior of Heterogeneous Systems" in *Progress in Dielectrics*, John Wiley and Sons, NY, Vol7, pp. 67-114.
- Wobschall, D., 1977, "A Theory of the Complex Dielectric Permittivity of Soil Containing Water: the Semidispersed Model, *IEEE, Transaction on Geoscience Electronics*, Vol. 15, No 1, pp. 49-58.